

Zuschläge für erhöhte Belästigung bei tieffrequentem Lärm

Detlef Krahe

Bergische Universität Wuppertal, krahe@uni-wuppertal.de

Einleitung

Von Geräuschen mit einem tonalen Charakter geht eine erhöhte Belästigung aus. Auch bei tiefen Frequenzen. Dies wird bei der DIN 45680 (Messung und Bewertung von tieffrequenten Geräuschen) [1] dadurch berücksichtigt, dass für Geräusche mit „deutlich hervortretenden Einzeltönen“ die Bewertung in gänzlich anderer Weise erfolgt, als bei Geräuschen ohne dieses Merkmal. Ob dieses Merkmal erfüllt ist, wird an Gegebenheit ausgemacht, die allerdings bei kleinster Änderung im Geräuschspektrum, zu dem einen oder anderen Bewertungsmodus führen können. Dieses Verhalten hat aber die Konsequenz, dass kleinste Unterschiede im Spektrum zu sehr unterschiedlichen Bewertungen führen können.

In einer Untersuchung [2] wird vorgeschlagen, eine erhöhte Lästigkeit bei tieffrequenten Geräuschen durch Zuschläge zu berücksichtigen, ohne allerdings darauf einzugehen, wie diese Zuschläge festgelegt werden sollen. Vorgestellt wird hier ein Verfahren, das eine erhöhte Lästigkeit durch Tonhaltigkeit aber auch anderer spektraler Auffälligkeiten mittels eines kontinuierlichen Zuschlags bewertet. Es gibt auch zeitlich definierte Auffälligkeiten, die mit einer erhöhten Lästigkeit verbunden sind, nämlich bei Geräuschen, die impulsartig oder amplitudenmoduliert sind. Für solche Auffälligkeiten wird ein weiterer Zuschlag vorgeschlagen. Die Maßgeblichkeit beider Zuschläge wurde anhand von 101 Stimuli verschiedenster Art untersucht, die den Frequenzbereich von 10 Hz bis 100 Hz abdecken. Diese Stimuli wurden von 23 Fachleuten abgehört und durch Vergabe verschiedener Zuschläge in ihrer gesteigerten Lästigkeit beurteilt.

Kontinuierlicher Zuschlag für Tonhaltigkeit

Ein sehr gleichmäßiges Rauschen besitzt keine auffälligen Merkmale, die mit einer erhöhten Belästigung verbunden sind, während ein reiner Sinuston mit einer markanten Spitze im Spektrum als sehr belästigend gilt. Es wird also ein Algorithmus gesucht, der die Gleichverteilung bzw. die Ungleichverteilung im Spektrum in möglichst einfacher Form geeignet bemisst. Die Aufgabenstellung erinnert an eine Bemessung des Kompressionsgewinns in der Audiocodierung: Die gesuchte Größe X beruht auf dem logarithmischen Verhältnis vom arithmetischen zum geometrischen Mittelwert der Komponenten des Terzspektrums. Die Terzkomponenten von 8 Hz bis 100 Hz (Anzahl = 12) werden in Anlehnung an die gültige Fassung der DIN 45680 bei den folgenden Ausführungen herangezogen. Damit lautet der Ansatz:

$$X = 10 \lg \frac{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N S_i}{\left(\prod_{i=1}^N S_i\right)^{1/N}} \quad (1)$$

mit S_i gleich den linearen Terzkomponenten und $N=12$.

Der Ausdruck kann weiterentwickelt werden zu:

$$X = 10 * \left[\lg \sum_{i=1}^N S_i - \lg N - \frac{1}{N} \lg \prod_{i=1}^N S_i \right] \quad (2)$$

$$= \lg \sum_{i=1}^N S_i - \lg N - \frac{10}{N} \sum_{i=1}^N \lg S_i \quad (3)$$

und mit

$$S_i = 10^{L_{eq,i}/10} \quad (4)$$

ergibt sich dann:

$$X = L_{eq} - 10 \lg N - \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N L_{eq,i} \quad (5)$$

Dabei ist L_{eq} der energetische Mittelwert des Signals im Bereich 8 Hz bis 100 Hz und $L_{eq,i}$ ist der energetische Mittelwert der i -ten Terzkomponente über die Messdauer.

Wie die nachfolgenden Beispiele zeigen, ist die einfach zu bestimmende Größe X geeignet, die zuvor angesprochene Spanne der Auffälligkeit abzubilden.

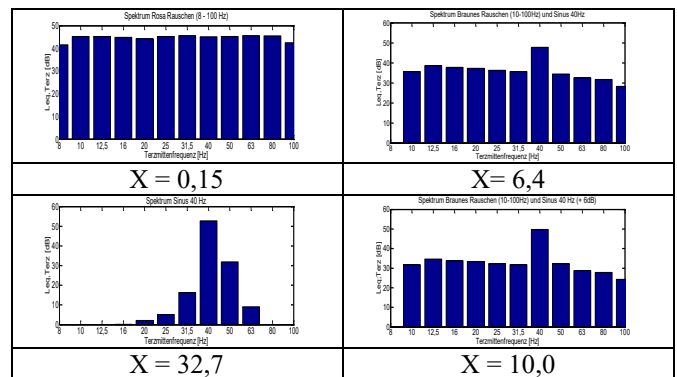


Abbildung 1: Rosa Rauschen (o.l.), Braunes Rauschen mit Sinus-Komponente (o.r.), Braunes Rauschen mit etwas stärkerer Sinus-Komponente (u.r.) und Sinus-Signal (u.l.) mit den zugehörigen Werten für die Größe X

Die Extremsituationen (Rosa Rauschen – Sinus) spannen einen weiten Wertebereich auf, innerhalb dessen Situationen mit detaillierten Unterschieden (hier Braunes Rauschen plus Sinus-Komponente mit leicht unterschiedlichen Pegeln) differenziert bemessen werden.

Damit fehlt aber noch der Bezug zur Bewertung von realen Lärmsituationen. Dazu wurden die Protokolle von 25 untersuchten Lärmsituationen herangezogen, die von Gutachtern in drei Stufen (nicht / klar / stark belästigend) bewertet wurden. Die Summe aus dem abzustimmenden Zuschlag und dem $L_{A,eq}$ im Bereich 8 Hz und 100 Hz (Breitband-Bewertung in der DIN 45680) wurde auf Unter- / Überschreitung der Anhaltswerte von 25 dB (Nacht) bzw. 35 dB (Tag) hin überprüft.

Um die Entscheidungen der Gutachter nachzubilden, muss die Größe X noch über eine Kennlinie geführt werden. Die sich daraus ergebende Forderungen nach einem Durchgang durch den Nullpunkt, einer Anfangssteigung von 3 und einem nachfolgenden Offset von 7 wird in der nachfolgenden Kennlinie vereinigt, deren Gleichung lautet:

$$\text{Zuschlag} = 4.2 * X / (1 + 0.14 * X) \text{ dB} \quad (6)$$

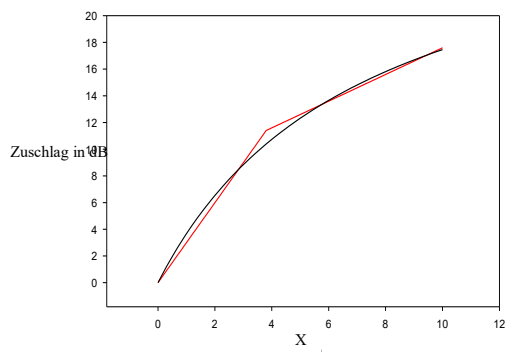


Abbildung 2: Kennlinie zur Überführung der Größe X in einen verifizierten Zuschlag

Untersuchungen mit Stimuli

Das Prinzip der Zuschläge sollte nach [1] auf weitere Signalcharakteristika ausgedehnt werden, die als auffällig gelten und zu einer erhöhten Lästigkeit führen können. Angeführt wurden neben der Tonhaltigkeit eine Frequenzmodulation, Amplitudenmodulation, Impulshaltigkeit und ein Informationsgehalt. Für eine zunächst grundlegende Untersuchung zur Umsetzbarkeit, wurde eine Sammlung von Stimuli mit folgenden Eigenschaften generiert:

- Sinustöne von 20 Hz, 40 Hz, 60 Hz, 80 Hz
- Frequenzmodulation der Sinustöne mit einem Hub von 1 Hz, 5 Hz und 10 Hz bei Modulationsfrequenzen von 1 Hz, 4 Hz und 10 Hz
- Amplitudenmodulation der Sinustöne mit einem Grad von 1%, 50 % und 100% bei Modulationsfrequenzen von 1 Hz, 4 Hz und 10 Hz
- Weißes Rauschen verschiedener Breite und verschiedener Mittenfrequenz
- Braunes Rauschen verschiedener Breite und Mittenfrequenz, teilweise kombiniert mit Sinustönen verschiedener Frequenz und Stärke
- Verschiedene Bassläufe, begrenzt auf 100 Hz
- Impulsfolgen, tiefpassgefiltert mit verschiedenen Perioden, verschiedenen Grenzfrequenzen und mit verschiedenen Flankensteilheiten.

Die Stimuli mit einer Abtastrate von 48 kHz, einer Auflösung von 24 Bit und einer Länge von jeweils 60 Sekunden wurden in einer Cloud bereitgestellt. Insgesamt 23 Fachleute luden sie herunter und bewerteten sie. Sie konnten in jeder der oben genannten fünf Kategorien 0 dB, 3 dB oder 6 dB als Zuschlag vergeben. Pro Stimulus waren auch Mehrfachvergaben möglich, da z.B. ein amplitudenmodulierter Sinus durch seine Tonhaltigkeit und

zusätzlich durch die Modulation erhöht belästigend wirken kann. Die Stimuli sollten in Lautstärke abgehört werden, die das Abhören gerade ohne Anstrengung erlaubt, da das Interesse speziell den Wirkungen in der Nähe der Hörschwelle galt. Die Stimuli waren entsprechend im Pegel so voreingestellt, dass sich von Stimuli zu Stimuli keine großen Sprünge in der Lautstärke ergaben. Abbildung 3 zeigt einen Ausschnitt aus der Liste, in die die Fachleute ihre Bewertungen eintrugen.

Tabelle 1: Ausschnitt aus Liste mit vergebenen Zuschlägen

File-Nr.	Tonhaltigkeit	Frequenzschwankung	Pegelschwankung	Impulzzuschlag	Informationshaltigkeit
69	0	0	0	0	0
70	0	6	0	0	0
71	3	0	3	3	0
72	3	0	0	0	0
73	0	0	3	3	0
74	3	0	0	0	0
75	0	0	3	3	0
76	6	6	0	3	0
77	0	0	0	0	0
78	0	0	0	0	0
79	6	0	3	0	0
80	3	0	0	0	0
81	6	0	0	0	0
82	6	0	0	6	0

Im weiteren Verlauf wurden folgende Verdichtungen der Daten vorgenommen. Die Zuschläge zur Tonhaltigkeit und zu Frequenzschwankungen (FM) einerseits und die Zuschläge zu Pegelschwankungen (AM) und zur Impulshaltigkeit andererseits wurden zusammengefasst. Auf die Verwertung der Zuschläge zur Informationshaltigkeit wurde verzichtet. Wie Tabelle 1 andeutungsweise entnommen werden kann, wurde diese Kategorie kaum bedacht. Relevanten Zuschlägen in dieser Kategorie wurde eigentlich nur beim Bass vergeben, was gut nachzuvollziehen ist. Da der Bass aber schon in den anderen Kategorien mit führend bei den Zuschlägen war, ergab das keine Verschiebungen im Gesamtbild.

Zuschläge für spektrale Auffälligkeit

Die Summe der Zuschläge für Tonhaltigkeit und FM jetzt als Zuschlag KST für spektrale Auffälligkeit bezeichnet, wurde wie zuvor dargestellt bestimmt. Allerdings wurde hier die Dynamik durch die Festlegung einer unteren Grenze der Terzpegel eingeschränkt, was durch die synthetische Erzeugung der Stimuli bedingt war. Dadurch konnten stark negative Pegelwerte entstehen, die ohne jeglichen Einfluss bei der Wahrnehmung aber die Größe X in erheblichem Maße hätte beeinflussen können. Bei den Spektren der angesprochenen Lärmbeschwerden hätte dies keine Auswirkung, da diese Beschränkung schon allein dadurch vorhanden ist, dass diese mit Mikrofonen aufgenommen wurden.

Abbildung 3 zeigt das Ergebnis der Berechnung. Obwohl die bewertenden Fachleute sicher nicht präzise wie ein Messgerät arbeiten, offenbart die Abbildung schon einen recht engen Zusammenhang zwischen der Summe der Zuschläge über alle Bewertungen und über die zwei Kategorien. Jeder Punkt der Grafik steht für einen Stimulus. Die Punkte in der Nähe des Ursprungs unterstreichen klar den bekannten Umstand, dass bei sehr tiefen Frequenzen (ca. < 30 Hz) keine Tonhöhendiskrimination mehr vorhanden

sind. Somit kann auch keine erhöhte Lästigkeit von solchen Geräuschen ausgehen.

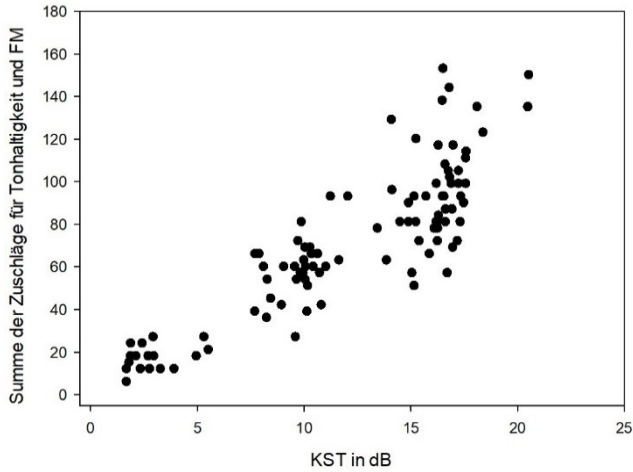


Abbildung 3: Summe der bei den einzelnen Stimuli gegebenen Zuschläge für eine spektrale Auffälligkeit über dem berechneten Zuschlag für spektrale Auffälligkeit KST

Die statistischen Parameter einer mit auf den Ursprung festgelegten linearen Regression unterstreichen den sich visuell bietenden recht engen Zusammenhang zwischen KST und den gegebenen Zuschlägen:

Data Source: KST 10 100.JNB
Equation: Polynomial; Linear
 $f = y_0 + a \cdot x$

R	Rsqr	Adj Rsqr	Standard Error of Estimate	
0,8659	0,7498	0,7498	17,4826	
	Coefficient	Std. Error	t	P
y0	-0,0000	0,0000	(+inf)	<0,0001
a	5,8477	0,1325	44,1408	<0,0001

Die Ausdehnung der Werte von KST bis ca. 20 dB mag für manchen überraschend sein. Aber auch bei der Bewertung gemäß der aktuellen Fassung der DIN 45680 können sich zwischen dem breitbandigen und tonhaltigen Modus die Ergebnisse im Extremen in dieser Größenordnung unterscheiden. Bei nur kleinsten Unterschieden im Spektrum, die bisweilen über die Anwendung des einen oder anderen Modus entscheiden, gäbe es im $L_{A,eq}$ kaum einen Unterschied. Der Unterschied in den Ergebnissen entspräche dann einem Zuschlag.

Zuschläge für zeitliche Auffälligkeit

Der zeitlich bedingte Zuschlag soll ebenfalls aus den Terzwerten ermittelt werden. So kann die Auswertung des Geräusches ohne ein extra zu definierendes und zu realisierendes Filter auf den Bereich tiefer Frequenzen begrenzt werden. Das hat den Vorteil, dass die Terzfilter definiert und vielfach schon vorhanden sind, bedingt aber eine gewisse Zeitauflösung bei den Terzsignalen, um relevante Details im Zeitverlauf noch aufdecken zu können. Eine Zeitauflösung zwischen 10 ms und 20 ms sollte es sein, um Modulationen noch auswerten zu können. Zudem kann dadurch in gewissem Rahmen der Verlust der Phaseninformation kompensiert werden. Der

Rechenaufwand bei den Terzen mit sehr tiefen Mittenfrequenzen kann ohne weiteren Informationsverlust durch Downsampling reduziert werden. Die Notwendigkeit einer erhöhten Speicherkapazität stellt auch kein Problem dar.

Ein erster Ansatz, der sich an der Bestimmung des Impulszuschlages in der TA Lärm als Differenz aus dem $L_{AFT,eq}$ und dem $L_{A,eq}$ orientierte, stellte sich wie folgt dar:

- Innerhalb eines Zeitfensters von 1 Sekunde wird parallel in jeder Terz separat der maximale A-bewertete und Fast-bewertete Pegelwert ermittelt.
- Am Ende des 1-Sekunden-Zeitfensters wird über alle Terzen aus den maximalen Werten der energetische Mittelwert bestimmt.
- Innerhalb eines 5-Sekunden-Fensters wird dies fünf Mal wiederholt.
- In diesem 5-Sekunden-Zeitfenster wird der größten 1-Sekunden-Maximal-Wert ausgewählt. Das ergibt einen maximalen 5-Sekunden-Wert.
- Aus allen 5-Sekunden-Maximal-Pegeln, die sich über die Messdauer ergeben, wird der energetische Mittelwert bestimmt.
- Vom Ergebnis wird der $L_{A,eq}$ abgezogen. Die Differenz ergibt den Zuschlag KTT für die zeitliche Auffälligkeit.

Anmerkung zu diesem ersten Versuch: In Ermangelung der Phaseninformation, die eigentlich zur Bestimmung des Maximal-Wertes notwendig ist, gab es zur Abschätzung zunächst eine Summation (energetischer Mittelwert) der jeweiligen 1-Sekunden-Maximal-Werte der Terzen. Da sich innerhalb dieses Zeitraumes ein Signal in der spektralen Zusammensetzung ändern kann, ist damit die Wahrscheinlichkeit einer Überschätzung gegeben. Wäre Schritt a) direkt auf 5 Sekunden ausgedehnt worden, wäre die Wahrscheinlichkeit umso größer. Dies und eine weitere Unzulänglichkeit dieser Lösung werden in Abbildung 4 ersichtlich.

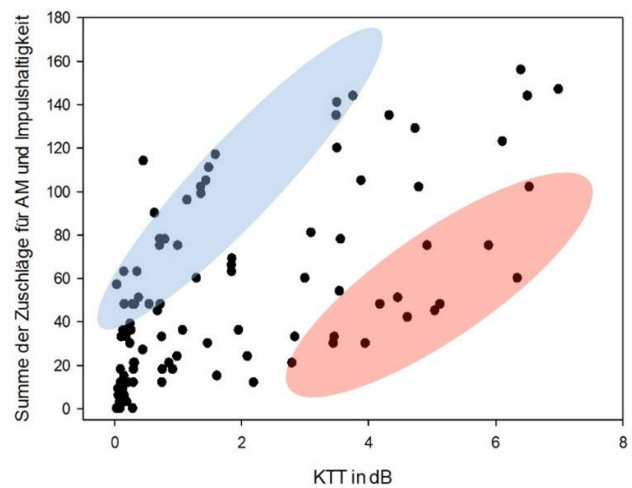


Abbildung 4: Summe der bei den einzelnen Stimuli gegebenen Zuschläge für eine zeitliche Auffälligkeit über dem berechneten Zuschlag für zeitliche Auffälligkeit KTT (1. Ansatz)

Die recht große Streuung ist natürlich wenig zufriedenstellend. Sie beruht aber weniger auf einer Streuung in der Bewertung der Fachleute, sondern ist mehr eine systematische Unzulänglichkeit in der Bestimmung von KTT. Im grob rot unterlegten Bereich befinden sich primär rauschförmige Stimuli. Im grob blau unterlegten Bereich befinden sich vor allem Stimuli mit einer Modulation, insbesondere solche mit einer Modulationsfrequenz von 4 Hz.

Im ersten Fall wirkt sich das schon angesprochene Problem aus, dass das Zeitfenster unter Schritt a) schon zu lang ist. Die spektralen Inhalte variieren bei Rauschsignalen innerhalb einer Sekunde schon so stark, dass ein Heranziehen allein des Maximalwertes jeder Terz zu einer Überschätzung des eigentlichen Maximalwertes führt. Mit einer Verkürzung des Zeitfensters kann dieser Effekt gemindert werden.

Im zweiten Fall verdeckt das Zeitfenster von einer Sekunde ebenfalls für die Bewertung relevante Signaleigenschaften, indem z.B. eine Amplitudenmodulation mit 4 Hz nicht erkannt wird. Der Algorithmus war dahingehend zu ertüchtigen, dass er nicht nur die Modulation erkennt, sondern möglichst die besondere Auffälligkeit der 4 Hz-Modulation noch hervorheben kann. Aufgrund dieser Erkenntnis wurde der Algorithmus wie folgt modifiziert:

- Die linearen Terzwerte werden in jedem Abtastschritt direkt summiert.
- Das sich daraus ergebende Summensignal wird in zwei Zweigen parallel ausgewertet
- In einem Zweig wird in einem Zeitfenster von 250 ms der Maximalwert ermittelt. Die sich über die Messdauer so ergebenden linearen Werte werden gemittelt.
- In dem anderen Zweig wird das Summensignal über ein Filter geführt, das Anteile anhebt, die auf eine Modulation vorzugsweise mit 4 Hz zurückzuführen sind. Dann wird der Maximalwert innerhalb eines 5-Sekunden-Rasters ermittelt. Die sich daraus ergebende Folge von Werten wird über die Messdauer gemittelt.
- Abschließend werden die Ausgangssignale beider Zweige logarithmiert und gewichtet summiert. Davon wird der $L_{A,eq}$ abgezogen.

Aufzuklären wäre noch, warum die A-bewerteten Spektralwerte herangezogen werden. Eine Erkenntnis aus der Bewertung der Stimuli war, dass frequenzmodulierte Stimuli zu tiefen Frequenzen hin vermehrt nicht einen Zuschlag bei der spektralen Auffälligkeit erhielten, sondern eher bei der zeitlichen Auffälligkeit. Es wurde eher eine Variation der Lautstärke als der Frequenz wahrgenommen, was auf den Anstieg der Isophonkurven in diesem Frequenzbereich zurückzuführen ist. Mit der A-Bewertung lässt sich das in geeigneter Form berücksichtigen. Tendenziell muss nach der Überarbeitung die blaue Zone in Abbildung 4 mehr nach rechts rücken, die rote nach links. Abbildung 5 zeigt das Ergebnis dieser Überarbeitung.

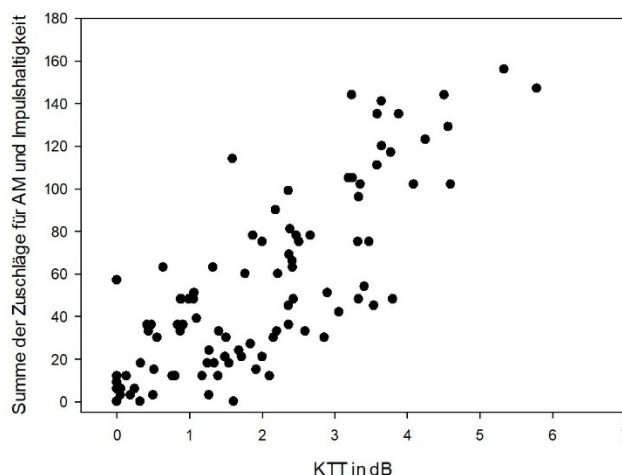


Abbildung 5: Summe der bei den einzelnen Stimuli gegebenen Zuschläge für eine zeitliche Auffälligkeit über dem berechneten Zuschlag für zeitliche Auffälligkeit KST (nach Überarbeitung)

Die Verbesserung ist deutlich erkennbar und schlägt sich in einer noch zufriedenstellenden Statistik nieder, bei der auch hier eine lineare Regression mit einem Nulldurchgang als Modell vorgegeben wird. Mit der Steigung von ca. $a = 26$ und einer Anzahl von 23 Begutachtern bildet KTT einen ca. 1:1 zu vergebenden Zuschlag für die zeitliche Auffälligkeit ab.

Data Source: KTT 10 100.JNB

Equation: Polynomial; Linear

$f = y_0 + a \cdot x$

R	Rsqr	Adj Rsqr	Standard Error of Estimate		
0,8086	0,6539	0,6539	24,7852		
		Coefficient	Std. Error	t	P
y0		-0,0000	0,0000	(+inf)	<0,0001
a		26,1679	1,0513	24,8903	<0,0001

Zusammenfassung

Mit den vorgestellten Zuschlägen ist ein Ansatz geschaffen worden, tieffrequente Geräusche problemgerechter zu beurteilen. Erstens können damit Zufälligkeiten weitgehend ausgeblendet werden, die deutlich unterschiedliche Beurteilungen zur Folge haben können. Beim selben Problem sollten zwei Gutachter zum (annähernd) selben Ergebnis kommen. Zudem wird mit dem Zuschlag für zeitlich definierte Auffälligkeiten erstmals ein Geräuschcharakteristikum berücksichtigt, das zweifellos mit einer höheren Lästigkeit verbunden sein kann.

Literatur

- [1] DIN 45608: Messungen und Bewertungen tieffrequenter Geräusche in der Nachbarschaft; Fassung 1997
- [2] Schmidt, M.: Forschungsvorhaben zur Messung und Prognose der Einwirkung tieffrequenter Schalle an Immissionsorten für DIN 45680; Abschlussbericht Müller BBM BBM Nr. M111460/05